



# **PROJETO DE GRADUAÇÃO**

## **Simulação Numérica de Processos de Indentações**

Por,  
**Túlio Avelar Guimarães**

**Brasília, 27 de Junho de 2012**

**UNIVERSIDADE DE BRASILIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA**

**UNIVERSIDADE DE BRASILIA**

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**Simulação Numérica de Processos de  
Indentações**

POR,

**Túlio Avelar Guimarães**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico.

**Banca Examinadora**

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, UnB/ ENM  
(Orientador)

---

Prof. Antônio Piratelli Filho, UnB/ ENM

---

Prof. Cosme Roberto Moreira da Silva, UnB/ ENM

---

Brasília, 27 de Junho de 2012

### ***Dedicatória***

*À minha mãe Gislene Margaret Avelar Guimarães e ao meu pai Cláudio Ricardo Garcia Guimarães (in memoriam), por todo o apoio e dedicação durante toda a minha graduação, que me permitiram vencer mais esta etapa de minha vida.*

*Túlio Avelar Guimarães*

## **Agradecimentos**

*À minha família: meus pais e meus irmãos Taís, Paulo e Poliana, pela ajuda e por saber que pude contar com eles nos piores e melhores momentos.*

*Ao meu orientador Jorge Luiz de Almeida Ferreira, pelo direcionamento e atenção durante a realização do projeto.*

*Aos meus amigos e colegas de faculdade, em especial a Álvaro e Gabriel que estiveram sempre prontos a ajudar e tornaram o curso mais divertido.*

*À Ana Paula Ganassoli, pela amizade, dedicação e compreensão em todos os momentos.*

*Túlio Avelar Guimarães*

---

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a criação e validação de um código para a simulação numérica a partir de elementos finitos da criação de moedas resultantes do contato entre indentadores agudos e superfícies planas. Para isso, será utilizado o software comercial Ansys, com a aplicação de um indentador cônico, com semi-ângulo de  $70,3^\circ$ . Foram utilizados os aços AISI 1006, AISI 1080 e o aço inoxidável TD-08. Os resultados destas simulações foram comparados com os obtidos experimentalmente por Pulecio (2010). Este código poderá ser utilizado em trabalhos posteriores para a análise do gradiente de tensões de Von Mises no contato entre as camadas internas e externas de cabos condutores de energia elétrica do tipo CAA (Cabos de Alumínio com Alma de Aço). O conhecimento preciso de como se comportam as tensões no contato é importante, pois permite a criação de projetos mais econômicos e confiáveis para linhas de transmissão.

Palavras-chave: Simulação Numérica, Contato, Indentação, Tensão de Von Mises

---

## ABSTRACT

This work aims at the creation and validation of a code for the numerical simulation from the finite element creating dents resulting from contact between plane surfaces and acute indenters. For this, will be used the commercial software Ansys, with the application of a conical indenter with a half-angle of  $70,3^\circ$ . It has been used the AISI 1006 and AISI 1080 steels and stainless steel TD-08. The results of these simulations were compared with those obtained experimentally by Pulecio (2010). This code can be used in subsequent work to analyze the gradient of Von Mises stresses at the contact between the inner and outer layers of cable conductors of electricity like CAA (Aluminum Cable Steel Reinforced). The precise knowledge of how to behave tensions in contact is important because it allows the creation of projects more economical and reliable transmission lines.

Keywords: Numeric Simulation, Contact, Indentation, Von Mises Stress

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVO.....	3
1.2 JUSTIFICATIVA .....	3
1.3 METODOLOGIA.....	4
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	5
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
2.1 A MECÂNICA DO CONTATO .....	6
2.2.1 Atrito Indentador-Amostra.....	9
2.2 O ENSAIOS DE DUREZA .....	10
2.2.1 Dureza Brinell .....	10
2.2.2 Dureza Vickers.....	11
2.3 O PROBLEMA DE CONTATO DE HERTZ .....	12
2.4 O PROCESSO DE RECUPERAÇÃO ELÁSTICA.....	15
2.5 FENOMENOS DE PILE-UP E SINK-IN .....	16
<b>3 MÉTODO DE MODELAGEM .....</b>	<b>20</b>
3.1 GEOMETRIA E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS .....	20
3.1.1 Aplicação da plasticidade.....	21
3.2 TIPOS DE ELEMENTO E MALHA .....	23
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>26</b>
4.1 ANÁLISE DA VALIDADE DO CÓDIGO .....	26
4.2 FENÔMENO DE PILE-UP E SINK-IN .....	27
4.3 ESTADO DE TENSÕES DE VON MISES .....	28
<b>5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>30</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>32</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>33</b>
Dados de Tensão x Deformação para os materiais utilizados .....	33
CÓDIGO UTILIZADO PARA AS SIMULAÇÕES.....	34

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Encordoamento do cabo IBIS CAA 397,5 MCM; (b) Montagem cabo-grampo de sustentação (Fadel, 2010, modificado) .....	1
Figura 2 - Detalhe da camada interna do cabo, mostrando as mossas formadas pelo contato com a camada externa e a quebra de um fio de cada uma delas (Fadel, 2010, modificado) .....	2
Figura 3 - Contato entre indentador e superfície. (a) Gráfico Tensão x Deformação; (b) Gráfico Carga x Deslocamento; (c) Superfície após o descarregamento (Pulecio, 2009, modificado) .....	6
Figura 4 - Gráfico Carga x Profundidade de penetração (Pulecio, 2010) .....	7
Figura 5 – Gráfico: Tensão x Deformação de um material. ....	8
Figura 6 - Profundidade x Raio de indentação para quatro valores de coeficiente de atrito. Indentador cônico com semi-ângulo de: (a) 70,3° e (b) 42,3° (Pulecio, 2010).....	9
Figura 7 - Ensaio de dureza Brinell (a) Momento de aplicação da Força; (b) Término do ensaio com impressão no corpo de prova (Cipriano, 2008) .....	11
Figura 8 - Esquema da medição da dureza Vickers (No contexto deste trabalho, $F=P$ ) .....	12
Figura 9 - Esquema do contato entre uma esfera e um plano (a) Indentador Rígido; (b) Indentador Elástico (Pulecio, 2010) .....	13
Figura 10 - Distribuição de pressão em no contato entre uma esfera e um plano ( $p_{max} = p_0$ ) (Budynas, Nisbett, 2006).....	14
Figura 11 - Recuperação elástica após a retirada do indentador (Pulecio, 2010) .....	15
Figura 12 - Fenômenos de (a) Pile-up e (b) Sink-in (Pulecio, 2010) .....	17
Figura 13 - Simulação por elementos finitos do fenômeno de sink-in utilizando um indentador cônico. (a) Distribuição da tensão de Von Mises; (b) Deslocamento dos nós. (Pulecio, 2010) .....	18
Figura 14 - Simulação por elementos finitos do fenômeno de pile-up utilizando um indentador cônico. (a) Distribuição da tensão de Von Mises; (b) Deslocamento dos nós. (Pulecio, 2010) .....	18
Figura 15 - Nível de Pile-up / Sink-in em função de $h_r/h_{máx}$ (Pulecio, 2010) .....	19
Figura 16 - Diagrama Tensão x Deformação para o TD-08 .....	22
Figura 17 - Diagrama Tensão x Deformação para o AISI 1006 .....	22

Figura 18 - Diagrama Tensão x Deformação para o AISI 1080 .....	23
Figura 19 – Geometria dos elementos planos utilizados: (a) PLANE42 e (b) PLANE82. (Ansys Element Reference).....	24
Figura 20 – (a) Malha de elementos utilizada para simulações numéricas em 2D; (b) Detalhe do refinamento da malha próxima à região do contato .....	24
Figura 21 - Geometria dos elementos de contato: (a) CONTA171 e (b) CONTA172 (Ansys Element Reference) .....	25
Figura 22 - Esquema do contato em superfície alvo utilizando o elemento TARG169 (Ansys Element Reference) .....	25
Figura 23 - Fenômeno de Pile-Up, observado na simulação com o material indentado sofrendo deformação plástica.....	27
Figura 24 - Fenômeno de Sink-In, observado na simulação com ambos os materiais apenas sofrendo deformação elástica .....	27
Figura 25 - Tensão de Von Mises para o aço AISI 1006 .....	29



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Geometria do contato e propriedades elásticas da superfície (Pulecio, 2010, modificado) .....	13
Tabela 2 - Propriedades Mecânicas dos materiais utilizados .....	21
Tabela 3 – Comparação dos resultados experimentais e obtidos pelas simulações .....	26

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$a$	Raio da superfície de contato	[m]
$A_c$	Área de Contato	[m <sup>2</sup> ]
$A_{cp}$	Área de Contato Projetada Real	[m <sup>2</sup> ]
$A_{sp}$	Área de Contato Projetada Sem Pile-Up ou Sink-in	[m <sup>2</sup> ]
$D$	Diâmetro do Indentador	[m]
$HB$	Dureza Brinell	[HB]
$E$	Módulo de Elasticidade	[GPa]
$E_r$	Módulo de Elasticidade Reduzido	[GPa]
$h$	Profundidade de Indentação	[m]
$h_c$	Altura da ponta do indentador ao último ponto de contato com a amostra	[m]
$n$	Coeficiente de Encruamento	
$p$	Pressão de contato	[Pa]
$P$	Carga de compressão dos sólidos	[N]
$p_0$	Pressão máxima (no centro do contato)	[Pa]
$r$	Distância radial a partir do eixo de simetria da indentação	[m]
$R$	Raio do Indentador	[m]
$S$	Rigidez de Contato	[N/m <sup>2</sup> ]
$u$	Deslocamento da superfície	[m]
$W_t$	Trabalho Total do processo de indentação	[J]
$W_p$	Trabalho Plástico do processo de indentação	[J]
$W_e$	Trabalho Elástico do processo de indentação	[J]
$Y$	Limite de Escoamento do Material	[GPa]

## Símbolos Gregos

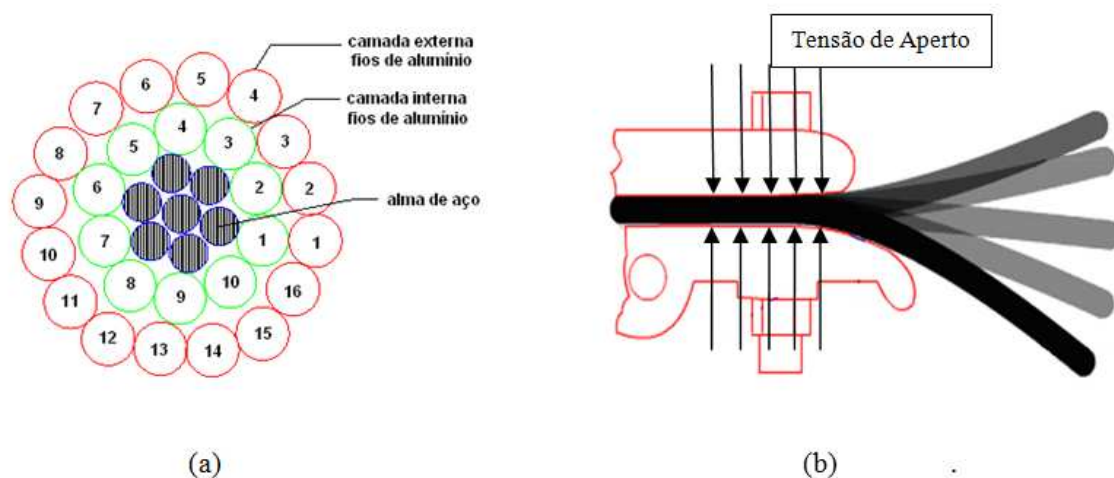
$\nu$	Coeficiente de Poisson	
$\delta$	Deslocamento de Mútua Aproximação	[m]
$\sigma$	Tensão aplicada	[GPa]
$\varepsilon$	Deformação do sólido	[%]
$\alpha$	Grau de empilhamento	
$\lambda$	Coeficiente da Curva de Carregamento	
$\rho$	Número de repetições dos ensaios	

## Subscritos

$i$	Indentador
$r$	Reduzido
$max$	Máximo

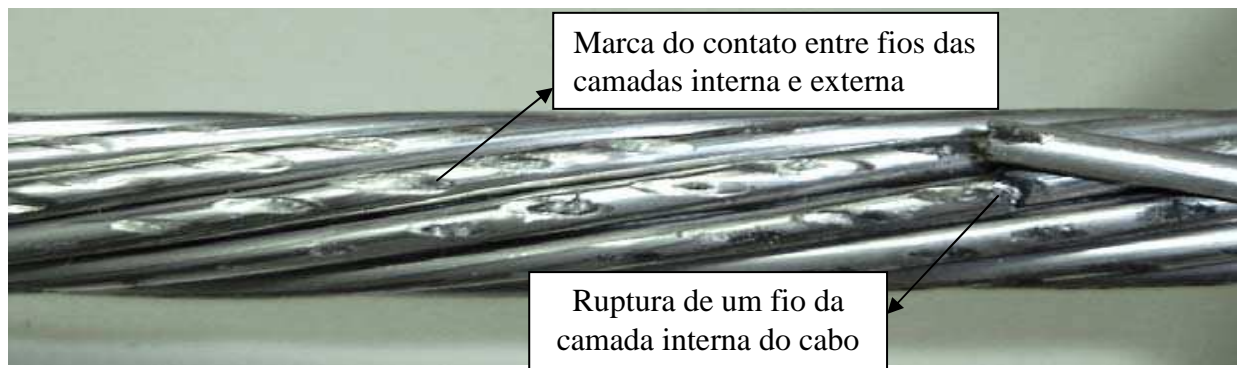
# 1 INTRODUÇÃO

O estudo da vida em fadiga de cabos condutores de energia elétrica é de extrema importância para o desenvolvimento de novas tecnologias que permitam uma transmissão mais segura e barata. O Grupo de Mecânica dos Materiais (GAMMA) da Universidade de Brasília faz um estudo com cabos CAA (Cabos de Alumínio com Alma de Aço), que são constituídos por camadas de fios de alumínio externamente (condutor) e um núcleo de fios de aço (auxiliar de resistência), como mostrado na Figura 1.



**Figura 1 - (a) Encordoamento do cabo IBIS CAA 397,5 MCM; (b) Montagem cabo-grampo de sustentação (Fadel, 2010, modificado)**

Os esforços cíclicos provocados pelo vento em conjunto com a tração do cabo e o aperto no grampo de sustentação causam o aparecimento de trincas nos fios de alumínio e conseqüente rompimento dos mesmos. A força de aperto do grampo de sustentação promove o surgimento de indentações no contato entre a camada interna e externa destes. A indentação, ou endentação é o processo em que o limite de escoamento de um material é excedido pelo contato com a superfície de outro material, promovendo uma deformação irreversível e causando uma descontinuidade geométrica no corpo após a retirada da força. É justamente nesses locais que surgem e se propagam as trincas nos cabos, como mostrado na Figura 2.



**Figura 2 - Detalhe da camada interna do cabo, mostrando as mossas formadas pelo contato com a camada externa e a quebra de um fio de cada uma delas (Fadel, 2010, modificado)**

O concentrador de tensões gerado nestas mossas, em conjunto com a carga cíclica à qual está submetido o cabo condutor, promove o surgimento das trincas no local do contato dos fios, levando ao rompimento do cabo por fadiga.

Para o estudo do comportamento do cabo em fadiga é necessário que se conheça o estado de tensão nos pontos mais solicitados do mesmo, onde ocorre o contato dos fios das camadas interna e externa, no interior do grampo de sustentação. Porém, a determinação analítica deste problema é muito complexa. Usualmente utiliza-se a equação de Poffemberger-Swart para estimar o estado de tensões na boca do grampo de sustentação, porém esta formulação permite apenas a estimativa para o cabo como um todo, não sendo capaz de mostrar a distribuição da pressão em cada um dos fios, não podendo levar à análise de onde ocorre o maior esforço e maior chance de se iniciar a trinca. Este trabalho visa criar uma metodologia para analisar numericamente o processo de indentação, permitindo a verificação da distribuição de pressões nas superfícies indentadas. Os resultados obtidos poderão ser utilizados futuramente para estimar de forma mais precisa a distribuição de tensão nas mossas formadas pelo contato entre os fios do cabo, através da aplicação de uma carga cíclica durante o contato.

A simulação numérica por meio de elementos finitos permite a solução de problemas com geometrias complicadas a partir da criação de malhas com elementos simples e a resolução de matrizes por meio de programas computacionais. Para este trabalho foi utilizado o software comercial Ansys.

## **1.1 OBJETIVO**

Como não é possível estimar de forma precisa a vida em fadiga para cabos condutores de energia elétrica, é necessária uma verificação regular da integridade em campo. A obtenção da distribuição de pressão nos pontos de quebra dos fios permitirá o desenvolvimento de tecnologias para a produção de linhas mais resistentes e a diminuição dos custos com manutenção ou troca de cabos.

O objetivo básico do trabalho é a validação de um código de modelagem numérica, por meio de elementos finitos, do processo de indentação, para que os resultados possam ser aprofundados futuramente e permitam a estimativa da distribuição de pressão nas mossas geradas pelo contato dos fios de alumínio em cabos condutores do tipo CAA. Para isso, será implementado um código no programa Ansys para simular o contato de um indentador cônico com uma superfície plana, possibilitando a comparação dos resultados obtidos com os encontrados na literatura, e assim a validação do código utilizado. Com isso, é esperado que se tenha uma metodologia concreta para a simulação do processo de indentação, permitindo o entendimento de como se distribui a tensão nos corpos submetidos a essas condições. Esta metodologia permitirá uma posterior aplicação de geometria e condições de contorno específicas, estimando da melhor forma possível a tensão nos pontos mais solicitados dos fios de alumínio que compõem os cabos.

Uma vantagem da utilização de elementos finitos é a facilidade de obtenção dos resultados, em comparação com a solução analítica, e a qualidade da aproximação dos valores obtidos com a realidade.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

O crescimento econômico do Brasil gera a necessidade de um aumento no fornecimento de energia elétrica. A malha de Linhas de Transmissão (LTs) brasileira vem crescendo, baseada em cabos aéreos. Assim sendo, o desenvolvimento de projetos para estas linhas é necessário, pois é uma área que envolve uma grande quantidade de dinheiro, além da imagem do país para investimentos externos. Caso o sistema de fornecimento de energia do país seja falho, ou o produto final seja caro, entre outros fatores pelo custo de instalação e

manutenção, investidores estrangeiros podem ser inibidos a implantar empresas ou indústrias no país.

No Brasil, grande parte das Linhas de Transmissão foi implantada durante o regime militar. Sendo assim, a idade avançada de algumas linhas e a falta de tecnologia mais apurada para prever a vida de forma confiável impõe uma necessidade de verificação da integridade em campo dos cabos. Um processo que se torna muito caro quando se considera a imensa área brasileira e quantidade de linhas existentes.

Assim sendo, o projeto de linhas de transmissão de energia é de grande interesse e importância para o país. A capacidade de definir um melhor material ou carga de esticamento para cabos condutores é um decisivo para a economia das empresas e o barateamento da energia. Além disso, a capacidade de prever mais precisamente a vida em fadiga destes cabos pode diminuir a necessidade de verificação em campo da integridade, diminuindo também o custo de manutenção.

Para que se possa definir a vida dos cabos de forma mais precisa, é necessário que se conheça e de forma mais profunda o comportamento do material em fadiga no contato entre os fios de alumínio, onde se iniciam as trincas que promovem o rompimento dos mesmos. A análise por elementos finitos do processo de indentação possibilitará a posterior implementação da carga cíclica, permitindo assim a obtenção de resultados com uma boa aproximação para este problema.

Este trabalho surge como um processo inicial que, a partir da criação e validação de um código, assim como a verificação de vários aspectos das simulações de contato, permitirá a aplicação em trabalhos futuros de condições que se adéquem mais à realidade dos cabos condutores.

### **1.3 METODOLOGIA**

Para a realização deste projeto, inicialmente será realizada uma revisão bibliográfica, a fim de levantar o conhecimento necessário para o desenvolvimento das outras atividades. Todos os conceitos utilizados serão apresentados nesta etapa do trabalho.

Será implemetado um código para simulação, no programa Ansys, do contato entre um indentador cônico e uma superfície plana. Os resultados serão comparados com os obtidos

experimentalmente por Sara Aida Rodríguez Pulecio, em sua tese de doutorado, denominada: “Modelamento do ensaio de indentação instrumentada usando elementos finitos e análise dimensional: análise de unidade, variações experimentais, atrito e geometria e deformações do indentador”, apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

## **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O texto deste trabalho está dividido em quatro capítulos. O primeiro apresenta uma introdução, contextualizando o tema estudado, evidenciando a justificativa para a realização do projeto, os objetivos propostos e a metodologia utilizada no projeto.

O segundo capítulo é dedicado a uma revisão da bibliografia acerca da Mecânica do Contato e aspectos da indentação, além da utilização de elementos finitos na resolução de problemas nesta área. Esta parte do trabalho traz todos os conceitos importantes para a realização das simulações.

No terceiro capítulo apresenta o método pelo qual será modelado o problema, apresentando informações importantes sobre as características geométricas e propriedades do material utilizado e o tipo de elemento e malha da simulação por elementos finitos.

O quarto capítulo se dedica à apresentação dos resultados obtidos, uma comparação com os dados de Pulecio para a verificação da validade do código, e uma análise detalhada de todos os aspectos obtidos pela simulação.

O quinto e último capítulo contém as conclusões do trabalho, assim como propostas para trabalhos futuros, que darão continuidade ao estudo iniciado neste projeto.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 A MECÂNICA DO CONTATO

A área da engenharia conhecida como Mecânica do Contato estuda situações em que dois corpos tendem a ocupar o mesmo local no espaço ao mesmo tempo, alternando as condições de contorno e gerando forças de ação e reação na superfície dos corpos. Quando estes são pressionados entre si, as superfícies respondem inicialmente de maneira elástica e, se a força for retirada, ocorre uma recuperação total da forma original. Com o aumento da força de compressão, as tensões ultrapassam o Limite de Escoamento do material e o corpo passa a se deformar de forma irreversível. No primeiro caso, a tensão no material é armazenada na forma de energia de deformação elástica e é recuperada completamente durante o processo de descarregamento. Já no segundo, quando ocorre a retirada da carga, a parcela elástica da deformação é recuperada, enquanto aquela que ocorre no regime plástico se mantém, gerando uma descontinuidade geométrica na superfície. Para um corpo em regime perfeitamente plástico, não há recuperação elástica após o descarregamento. A Figura 3 mostra contato de um indentedor e um corpo nos diferentes regimes de deformação.

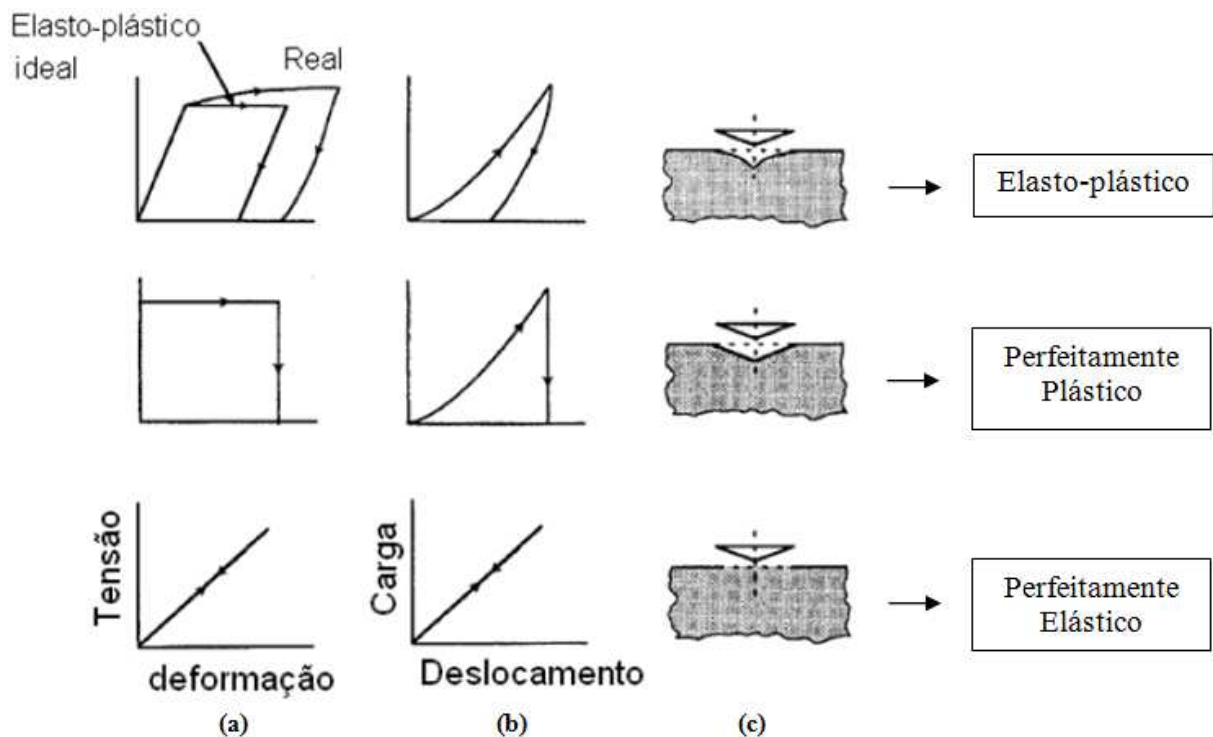


Figura 3 - Contato entre indentedor e superfície. (a) Gráfico Tensão x Deformação; (b) Gráfico Carga x Deslocamento; (c) Superfície após o descarregamento (Pulecio, 2009, modificado)



Na indentação de um material elastoplástico o Trabalho Total ( $W_t$ ) equivale à soma do Trabalho Plástico ( $W_p$ ) e do Trabalho Elástico ( $W_e$ ), como mostrado na Figura 4. Nesta figura, a rigidez de contato ( $S$ ) é caracterizada pela inclinação da parte superior da curva de carregamento, enquanto  $\delta_r$  e  $\delta_{max}$  representam, respectivamente, o deslocamento de mútua aproximação máximo e resultante após o descarregamento. Pode-se definir  $h_e$  traçando-se uma linha reta desde o ponto ( $P_{max}$ ,  $\delta_{max}$ ), com inclinação  $S$  até a o carregamento zero.

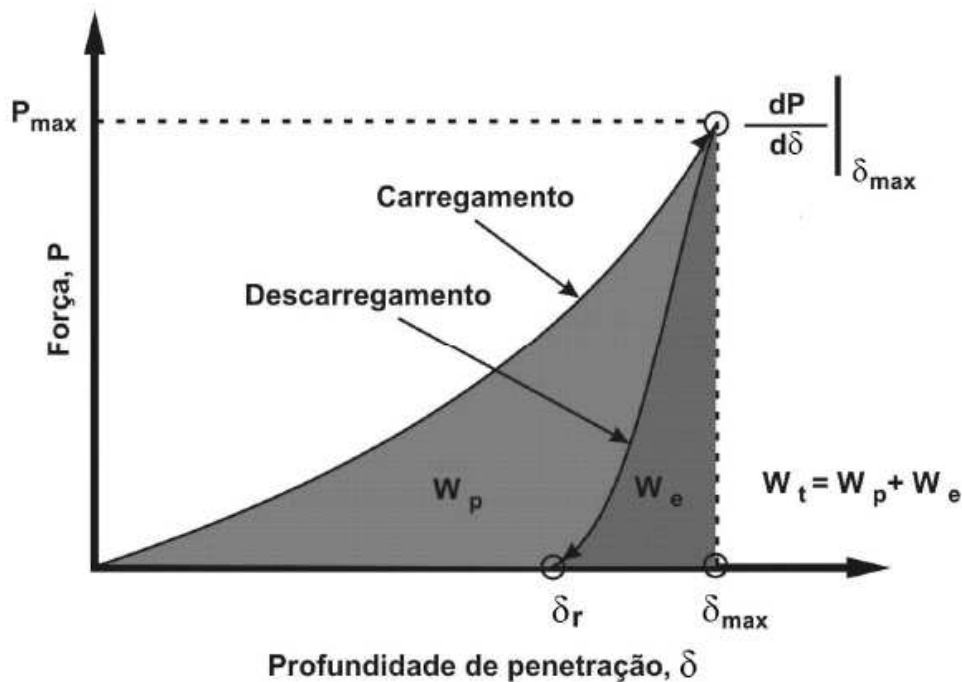
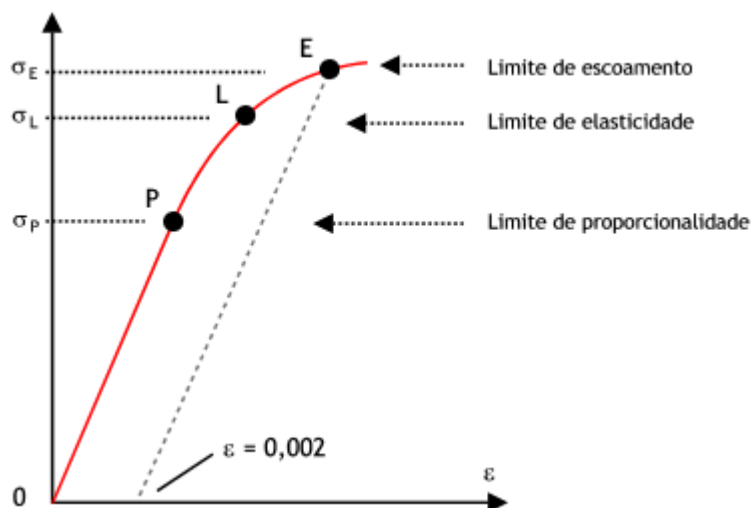


Figura 4 - Gráfico Carga x Profundidade de penetração (Pulecio, 2010)

Para a maioria dos materiais no regime elástico, a tensão aplicada é proporcional à deformação no corpo, obedecendo a uma relação linear. Tal relação é conhecida como Lei de Hooke, e só se aplica durante a deformação elástica. A Figura 5 apresenta um gráfico de Tensão x Deformação para um material. Os pontos da curva mostram os limites de Escoamento, Elasticidade e Proporcionalidade. A Lei de Hooke é válida para tensões abaixo do limite de proporcionalidade, porém, por convenção, o limite de escoamento é considerado para uma deformação de 0,2% para metais.



**Figura 5 – Gráfico: Tensão x Deformação de um material.**

De acordo com o resumo histórico da mecânica do contato apresentada por (Kikuchi, Oden, 1988), os problemas de atrito foram estudados muitos anos antes dos problemas de contato, e foram abordados somente para corpos rígidos (indeformáveis). O contato entre corpos começou a ser estudado de maneira mais profunda com o desenvolvimento da Mecânica dos Sólidos, a partir do século XIX. O primeiro a considerar os problemas de contato foi Poisson, em seu trabalho '*Traité de Mécanique*', de 1833, porém erros em seu trabalho geraram falhas nas soluções até de problemas mais simples de colisão entre sólidos. Pesquisas sobre o assunto foram apresentadas depois por Saint-Venant e Voight, mas eles também obtiveram soluções limitadas, não conseguindo resolver de forma precisa os problemas. Em 1882, Heinrich Hertz apresentou um trabalho intitulado '*On the Contact of Elastic Solids*', mostrando a distribuição de pressão na superfície do contato entre uma esfera e uma superfície plana. Este artigo é tido por alguns autores como o início da Mecânica do Contato. Depois de Hertz, a mecânica do contato vem se desenvolvendo e muitos estudos foram feitos para explicar, além da deformação elástica, a criação de mochas no regime de deformação plástica.

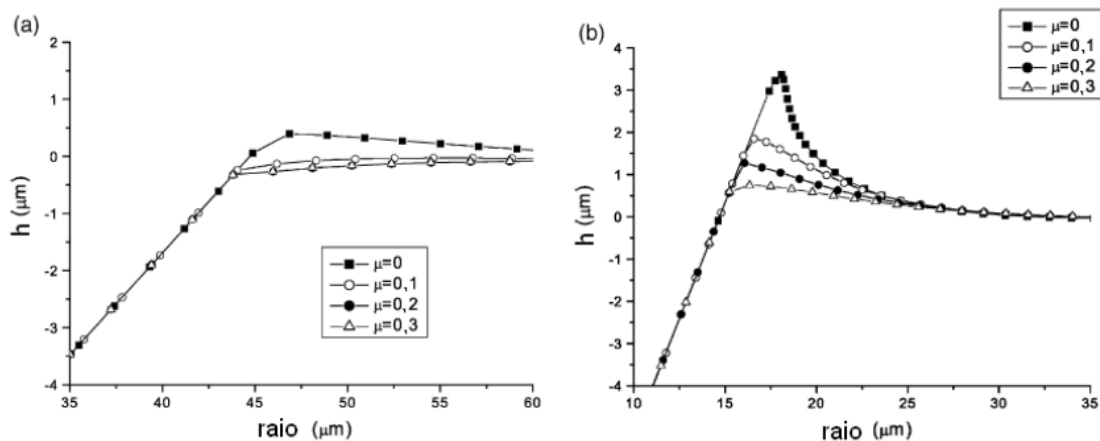
Após o trabalho de Hertz, o estudo dos problemas de contato só foi retomado no início do século XX. Um grande contribuinte para a área neste século foi o físico italiano Antonio Signorini, que em 1933 descreveu o comportamento de um sólido elástico em contato sem atrito com uma superfície rígida. Mais tarde, em 1959, o mesmo autor apresentou uma teoria mais completa sobre o assunto.

Inicialmente, o contato mecânico foi estudado basicamente no regime plástico, abordagens mais profundas puderam ser consideradas a partir o desenvolvimento da Teoria da Plasticidade. Com o surgimento de ferramentas computacionais e o desenvolvimento de métodos numéricos de resolução, problemas mais complexos puderam ser resolvidos, acelerando a evolução da Mecânica do Contato. A utilização de elementos finitos trouxe a capacidade de modelar situações mais específicas de forma relativamente simples.

### 2.2.1 Atrito Indentador-Amostra

Durante o processo de indentação, o atrito entre as superfícies dos corpos afeta significativamente o ensaio, pois interfere diretamente na formação do fenômeno conhecido como Pile-up, que consiste no acúmulo de material ao redor do indentador. Segundo Mata e Alcacá (2004, apud Pulecio, 2010), o atrito aumenta a tendência de formação do Sink-in, fenômeno oposto ao Pile-up. Ambos os fenômenos são apresentados de forma mais profunda no subtítulo 2.5 deste texto.

A Figura 6 mostra o perfil de indentação, com valores do coeficiente de atrito ( $\mu$ ) variando de zero a 0,3. Bucaille et al. (2003, apud Pulecio, 2010) mostraram que para indentadores com semi-ângulo menor, o atrito tem maior influência, aumentando significativamente a carga dentro de uma determinada faixa do raio da indentação.



**Figura 6 - Profundidade x Raio de indentação para quatro valores de coeficiente de atrito. Indentador cônico com semi-ângulo de: (a)  $70,3^\circ$  e (b)  $42,3^\circ$  (Pulecio, 2010)**

## 2.2 O ENSAIOS DE DUREZA

A primeira vez que a dureza de um material foi medida utilizando-se uma metodologia concreta foi com a escala Mohs, que se baseia na capacidade do material riscar superfícies. Porém, a falta de precisão do método e a baixa reprodutibilidade fazem com que este método não seja útil para aplicação em metais (CIPRIANO, 2008). A definição de dureza, propriamente dita, foi dada por Hertz como sendo “a pressão média do contato em que se dá início ao escoamento plástico quando pressionado por um corpo mais duro em contato com ele” (Pulecio, 2010). Devido à dificuldade de se detectar o início do escoamento, esta definição é pouco utilizada na prática. Outra técnica mais utilizada hoje para a medida da dureza é a de capacidade de penetração, na qual a medida depende diretamente da geometria do indentador. Vários tipos de geometria são utilizados para a medida da dureza a partir desta técnica, que incluem: esféricos, piramidais de quatro lados, piramidais de três lados e cônicos.

A geometria do indentador influencia no campo de tensões no contato, assim, apesar de poder-se utilizar qualquer indentador, diferentes geometrias são utilizadas quando se deseja calcular diferentes propriedades ou características. Indentadores esféricos são geralmente utilizados para o cálculo de propriedades plásticas, por apresentar uma transição mais suave entre o regime elástico e plástico. Os indentadores cônicos são utilizados para definição da tenacidade à fratura e piramidais de quatro lados do tipo Koop normalmente são utilizados para medir anisotropia de superfícies, segundo Fisher-Cripps (2002, apud Pulecio, 2010) e Bhushan e Li (2003, apud Pulecio, 2010).

### 2.2.1 Dureza Brinell

O primeiro método normatizado e amplamente utilizado na engenharia metalúrgica foi o proposto pelo engenheiro sueco Johan August Brinell, que consiste em um indentador de formato esférico, com diâmetro de 10 mm composto de aço de alta dureza ou tungstênio. A dureza Brinell (HB) é dada pela carga ( $P$ ), aplicada por um determinado intervalo de tempo, dividida pela área da superfície da calota esférica no contato entre o indentador e a amostra, como mostrado na Equação 2.1. No Brasil estes ensaios são regidos pela norma: ABNT NBR NM ISO 6506, de 2010, que apresenta também as normas para a verificação e calibração das máquinas de ensaio. A Figura 7 mostra um esquema do ensaio de dureza Brineell.

$$HB = 0,102 * 10^6 \frac{P}{A_c} = 0,102 * 10^6 \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - 4a^2})} \quad (2.1)$$

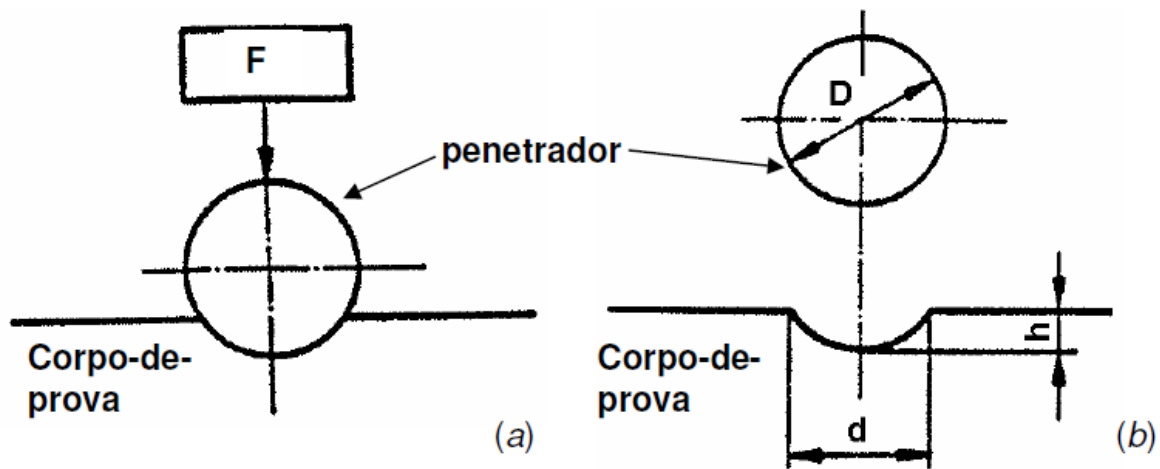


Figura 7 - Ensaio de dureza Brinell (a) Momento de aplicação da Força; (b) Término do ensaio com impressão no corpo de prova (Cipriano, 2008)

A medida é dada por tabelas padronizadas, através do diâmetro da área de indentação medido em duas direções perpendiculares entre si (a fim de minimizar erros no ensaio). Não existe um formato padrão para os corpos de prova utilizados neste ensaio, porém a espessura deve ser maior que 17 vezes a profundidade de indentação e a superfície, polida e deve formar um ângulo de exatamente  $90^\circ$  com o penetrador. Deve-se utilizar uma distância mínima entre medidas de quatro vezes o diâmetro da marca. Além disso, a distância entre a indentação e a borda do corpo de prova deve ser 2,5 vezes maior que o diâmetro da mesma (Cipriano, 2008).

### 2.2.2 Dureza Vickers

O método de medição da dureza Vickers ( $HV$ ) surgiu como uma alternativa para os ensaios de dureza Brinell e tem a vantagem de não a medida não depender das dimensões do indentador. Além disso, a escala de medição é muito ampla, podendo ser utilizada para uma grande faixa de durezas, incluindo todos os metais. No Brasil estes ensaios são regidos pela norma: ABNT NBR NM ISO 6507.

A medida é feita a partir das dimensões da marca resultante do contato com um indentador piramidal de quatro lados, como mostrado na Figura 8, retirada de AULATERMO-TMF1\_aula07\_txt.doc. O cálculo é feito com a utilização das duas diagonais,

diminuindo assim a probabilidade de erros experimentais. Essas medidas são inseridas na Equação 2.2, resultando na dureza do material.

$$HV = 0,102 \frac{P}{A_c} = 0,102 \frac{2P \operatorname{sen}\left(\frac{136}{2}\right)}{d^2} = 0,189 \frac{P}{d^2} \quad (2.2)$$

Em que:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2.3)$$

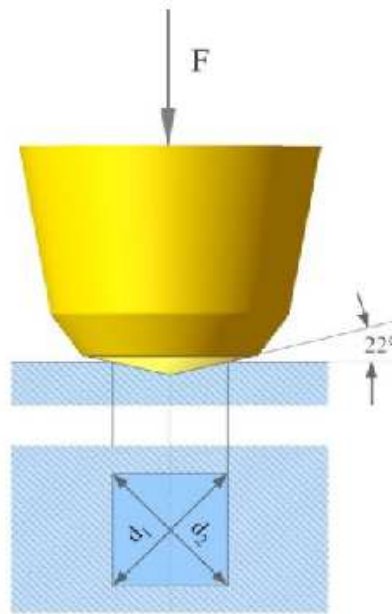
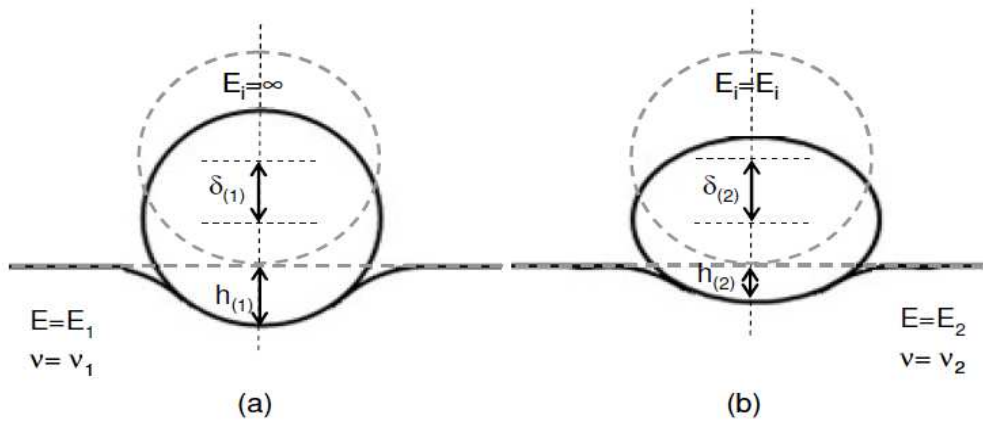


Figura 8 - Esquema da medição da dureza Vickers (No contexto deste trabalho, F=P)

## 2.3 O PROBLEMA DE CONTATO DE HERTZ

Hertz, a partir de experimento de lentes esféricas em contato com placas planas de vidro, verificou que a distribuição de pressão na superfície de contato tem um ponto máximo no primeiro ponto de contato entre os corpos e decresce com o aumento do raio, chegando a zero nos pontos onde acaba o contato. A Figura 9 apresenta um esquema do problema estudado por (Hertz, 1882) e a Tabela 1 apresenta dados da geometria e propriedades do contato para duas situações distintas: indentador rígido (Conjunto 1) e indentador elástico (Conjunto 2).



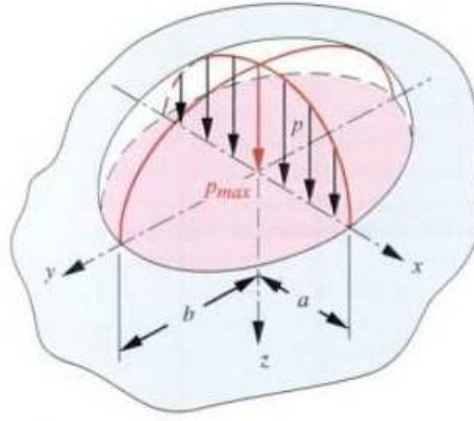
**Figura 9 - Esquema do contato entre uma esfera e um plano (a) Indentador Rígido; (b) Indentador Elástico (Pulecio, 2010)**

**Tabela 1 - Geometria do contato e propriedades elásticas da superfície (Pulecio, 2010, modificado)**

	Conjunto 1 Indentador Rígido	Conjunto 2 Indentador Elástico
Deslocamento normal da superfície do indentador ( $u_{zi}$ )	0	$u_{zi(2)}$
Deslocamento normal da superfície indentada ( $u_z$ )	$u_{z(1)}$	$u_{z(2)}$
Raio de contato ( $a$ )	$a_{(1)}$	$a_{(2)}$
Força de compressão dos sólidos ( $P$ )	$P_{(1)}$	$P_{(2)}$
Distância de aproximação mútua ( $\delta$ )	$\delta_{(1)}$	$\delta_{(2)}$
Profundidade de indentação sobre a superfície original indentada ( $h$ )	$h_{(1)} = \delta_{(1)}$	$h_{(2)}$
Módulo de Elasticidade do corpo ( $E$ )	$E_{(1)}$	$E_{(2)}$
Coefficiente de Poisson do corpo indentado ( $\nu$ )	$\nu_{(1)}$	$\nu_{(2)}$
Módulo de Elasticidade do indentador ( $E_i$ )	$\infty$	$E_{i(2)}$
Coefficiente de Poisson do indentador ( $\nu_i$ )	0	$\nu_{i(2)}$
Módulo reduzido ( $E_r$ )	$\frac{E}{1-\nu^2}$	$\left( \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} \right)^{-1}$

A distribuição de pressão na superfície de contato é dada por:

$$p = p_0 \left[ 1 - (r/a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$



**Figura 10 - Distribuição de pressão em no contato entre uma esfera e um plano ( $p_{max} = p_0$ ) (Budynas, Nisbett, 2006)**

Esta pressão, mostrada na Figura 10, gera um deslocamento  $u_z$  na superfície de contato dado pela equação:

$$u_z = \frac{1-\nu^2}{E} \frac{\pi p_0}{4a} (2a^2 - r^2) \quad (2.5)$$

Para o deslocamento do indentador, será utilizado o índice “i”, enquanto para deslocamentos da superfície indentada, não serão usados índices. Pode se escrever o Módulo Reduzido (Tabela 1) como:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu^2)}{E} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} \quad (2.6)$$

A pressão máxima no centro da superfície de contato depende da força de compressão dos corpos de acordo com a seguinte fórmula:

$$p_0 = \frac{3}{2} \frac{P}{\pi a^2} \quad (2.7)$$

Das condições de contorno do problema:

$$u_z + u_{zi} = \delta - \left( \frac{1}{2R} \right) r^2 \quad (2.8)$$

Calculando o deslocamento do indentador e da superfície pela Equação 2.5 e substituindo, esta e a Equação 2.6 na Equação 2.8, tem-se:

$$\frac{\pi p_0}{4a E_r} (2a^2 - r^2) = \delta - \left( \frac{1}{2R} \right) r^2 \quad (2.9)$$

O raio de contato, o deslocamento de mútua aproximação e a carga são dados por:



$$a = \frac{\pi p_0 R}{2E_r} \quad (2.10)$$

$$\delta = \frac{\pi a p_0}{2E_r} \quad (2.11)$$

$$P = \frac{4\sqrt{RE_r}\delta^{\frac{3}{2}}}{3} \quad (2.12)$$

Derivando a Equação 2.12 em relação a  $\delta$  e substituindo as equações 2.10 e 2.11 nesta, obtemos a Rigidez de Contato ( $S$ ), em que  $A_{cp}$  é a área de contato projetada da indentação ( $A_{cp} = \pi a^2$ ).

$$S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A_{cp}} \quad (2.13)$$

## 2.4 O PROCESSO DE RECUPERAÇÃO ELÁSTICA

Durante a formação da mossa, inicialmente o material responde elasticamente, uma vez que o limite de escoamento tenha sido ultrapassado, se inicia o processo de deformação plástica. No regime plástico, quando a força é retirada, a fração relativa ao deslocamento elástico é recuperada, enquanto a fração plástica gera uma descontinuidade na superfície de contato, conhecida como “profundidade remanescente” ( $h_r$ ). A Figura 11 mostra a recuperação elástica após a retirada de um indentador cônico.

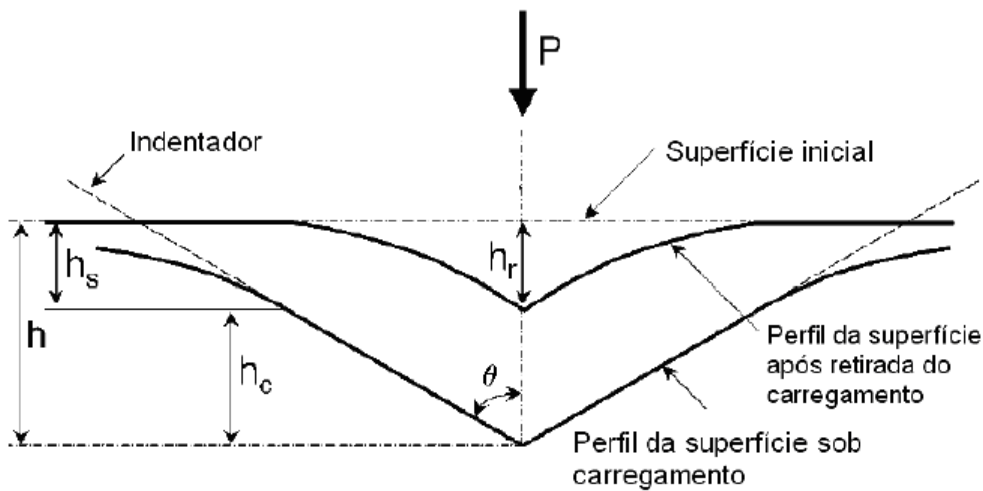


Figura 11 - Recuperação elástica após a retirada do indentador (Pulecio, 2010)

Nos ensaios convencionais, considera-se nos cálculos a área residual de indentação para o cálculo da dureza, o que gera grande diferença proporcional à recuperação elástica, quando comparada com a dureza sob carregamento.

Segundo (Dieter, 1981): “O efeito de mola é a variação dimensional sofrida pela peça conformada depois que a ferramenta de conformação é liberada. Isto ocorre devido às variações da deformação produzidas pela recuperação elástica.” O conceito é relativo ao processo de conformação mecânica, porém pode ser aplicado a este estudo, uma vez que ao retirar a carga do indentador, observa-se o mesmo efeito.

A deformação de muitos materiais elásto-plásticos pode ser aproximada pela Equação 2.14 em que  $E$  é o módulo elástico,  $n$  é o coeficiente de encruamento,  $Y$  é o limite de escoamento e  $\sigma$  é a tensão correspondente ao deslocamento. Para a maioria dos metais  $n$  tem valor entre 0 e 0,5. (Dieter, 1981).

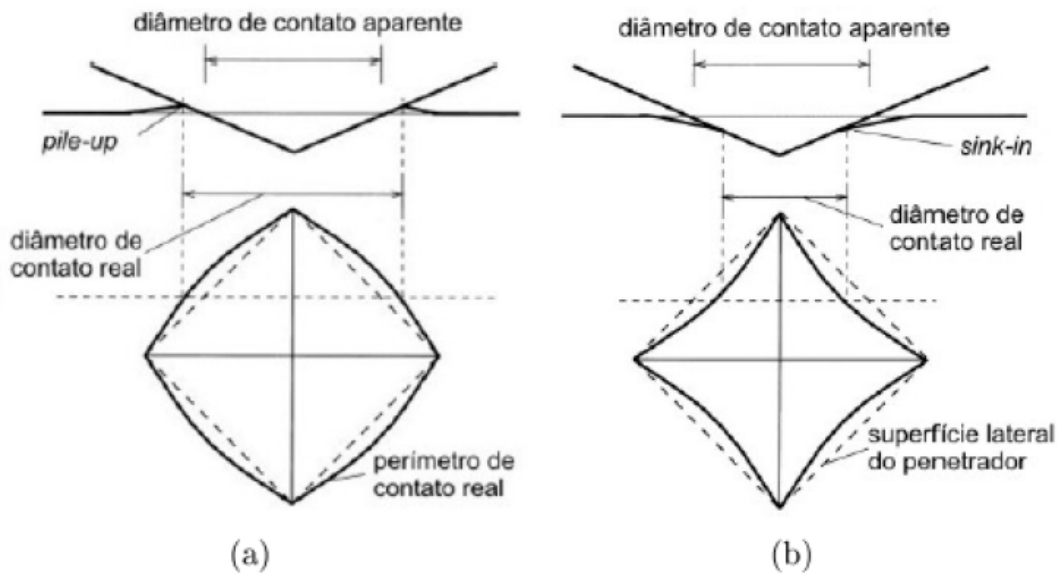
$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E}, & \text{para } \sigma \leq Y \\ \left(\frac{Y}{E}\right)\left(\frac{\sigma}{Y}\right)^{\frac{1}{n}}, & \text{para } \sigma > Y \end{cases} \quad (2.14)$$

A recuperação elástica será maior quanto maior for o limite de escoamento, menor for o módulo de elasticidade e maior for a deformação plástica aplicada ao material, desde que esta esteja na região plástica da deformação.

## 2.5 FENÔMENOS DE PILE-UP E SINK-IN

Em indentações de materiais elásticos, ocorre um fenômeno conhecido como sink-in, que consiste na retração da superfície ao redor do indentador. Isso faz com que a Área de Contato ( $A_C$ ) seja menor do que no caso em que não ocorre o fenômeno, pois a altura da calota esférica do contato ( $h_C$ ) é menor que a profundidade de indentação ( $h$ ).

Em contraposição ao sink-in, o fenômeno conhecido com pile-up, que tem origem na deformação plástica do material, promove o acúmulo de material ao redor do indentador, fazendo com que a Área de Contato seja maior que no caso em que não ocorre.



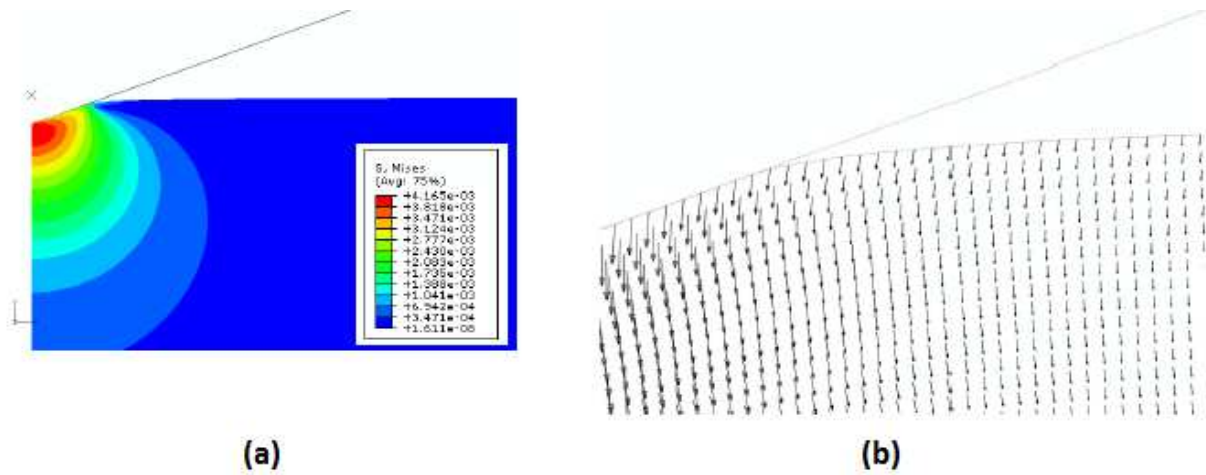
**Figura 12 - Fenômenos de (a) Pile-up e (b) Sink-in (Pulecio, 2010)**

A Figura 12 mostra os fenômenos e pile-up e sink-in com um indentador do tipo Vickers. A ocorrência de cada fenômeno depende de fatores geométricos do indentador e mecânicos dos dois corpos. O coeficiente de encruamento do material domina a ocorrência do fenômeno de pile-up, porém, este é também dependente da geometria do indentador, e da razão  $Y/E$  do corpo indentado (Pulecio, 2010).

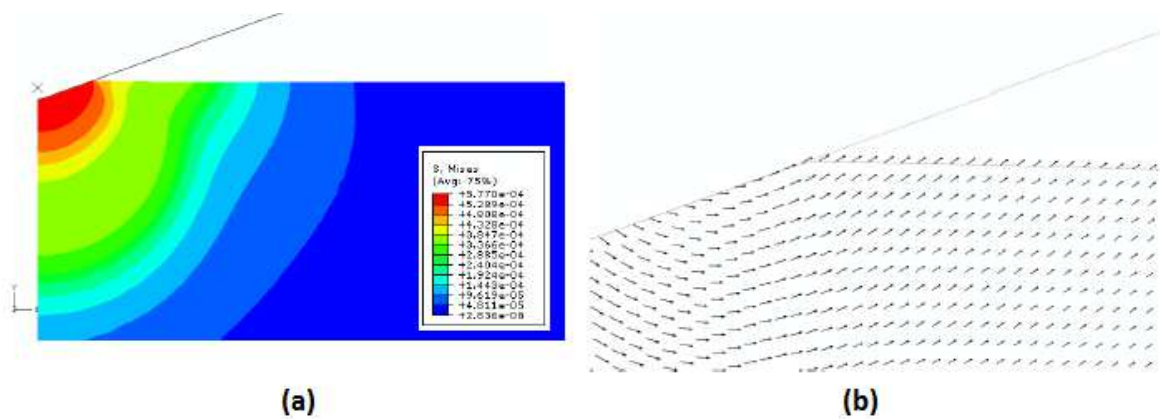
Define-se o grau de empilhamento ( $\alpha$ ) como a razão entre a Área Projetada Real ( $A_{CP}$ ) e a Área Projetada caso não ocorresse nenhum dos dois fenômenos ( $A_{SP}$ ), dada em função da profundidade ( $h$ ) e da geometria do indentador (Pulecio, 2010). Para  $\alpha > 1$  observa-se o fenômeno de sink-in.

$$\alpha = \frac{A_{CP}}{A_{SP}} \quad (2.15)$$

A Figura 13 apresenta o resultado de uma simulação numérica para um indentador cônico na qual é observado o sink-in, mostrando a distribuição da tensão de Von Mises e o deslocamento dos nós da malha. Para este efeito foram utilizados:  $Y = 1600,61$  MPa,  $E = 50,55$  GPa e  $n = 0,398$ . A Figura 14 mostra a simulação numérica, para o mesmo indentador, porém se observa o fenômeno de pile-up. Neste caso foram utilizados:  $Y = 335$  MPa,  $E = 210$  GPa e  $n = 0,101$ .



**Figura 13 - Simulação por elementos finitos do fenômeno de sink-in utilizando um indentedor cônico. (a) Distribuição da tensão de Von Mises; (b) Deslocamento dos nós. (Pulecio, 2010)**



**Figura 14 - Simulação por elementos finitos do fenômeno de pile-up utilizando um indentedor cônico. (a) Distribuição da tensão de Von Mises; (b) Deslocamento dos nós. (Pulecio, 2010)**

Para uma dada geometria do indentedor e um coeficiente de encruamento ( $n$ ) do material indentedo, o nível de pile-up pode ser dado em função da razão  $h_r/h$ . Casals e Alcacá, em 2005, em estudos com indentedor do tipo Berkovich, encontraram que, independente do encruamento, elementos com  $h_r/h_{\text{máx}} < 0,8$  não apresentam pile-up, como mostrado na Figura 15.

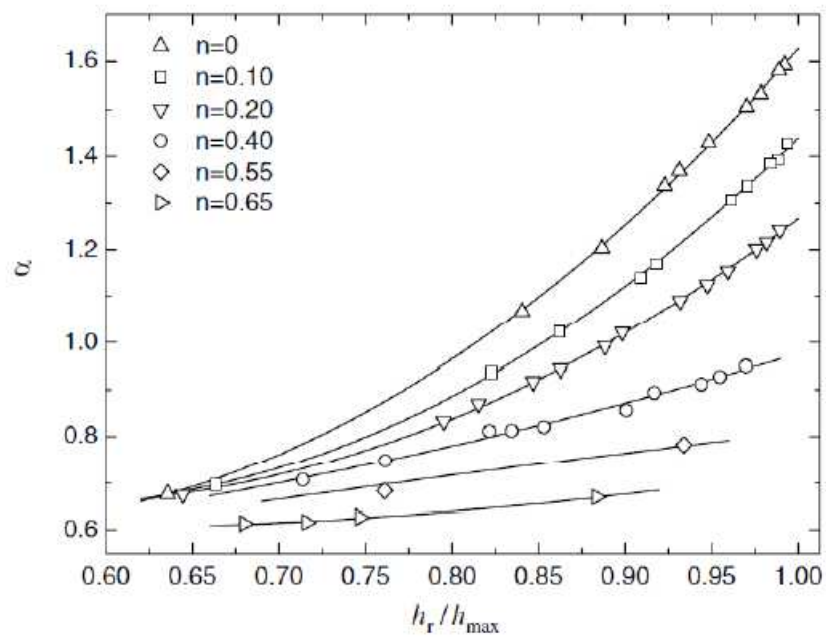


Figura 15 - Nível de Pile-up / Sink-in em função de  $h_r/h_{m\acute{a}x}$  (Pulecio, 2010)

## 3 MÉTODO DE MODELAGEM

A modelagem à qual se propõe este trabalho foi feita utilizando um algoritmo direto, que terá como entradas a geometria dos corpos e as propriedades dos materiais, como descritas no subtítulo 3.1. Foi utilizado o programa Ansys, que permite simulações por elementos finitos, obtendo na saída informações do estado de tensões de Von Mises, assim como as deformações no corpo indentado.

Uma carga de intensidade  $P$  será aplicada ao indentador no sentido a comprimi-lo contra o corpo a ser indentado. Como condição de contorno o movimento do indentador será restringido no eixo  $x$  e a rotação, permitindo apenas deslocamento vertical. E a base do corpo será engastada, restringindo a translação e rotação do mesmo.

A validação do código implementado será feita a partir de resultados obtidos por Sara Aida Rodríguez Pulecio, em sua tese de doutorado, denominada “Modelamento do ensaio de indentação instrumentada usando elementos finitos e análise dimensional: análise de unidade, variações experimentais, atrito e geometria e deformações do indentador”; apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. A partir do código gerado, será variada força aplicada ao indentador, possibilitando o levantamento da curva de Carga x Deslocamento ( $P \times \delta$ ), que é apresentada no trabalho de Pulecio.

Para definir o contato foi utilizado o Método Lagrangiano Aumentado (Augmented Lagrangian Method), definido no Keyopt2 do elemento de contato. Ele foi utilizado por apresentar convergência para todos os casos. Testes foram feitos como outros métodos apresentados pelo programa Ansys, porém alguns apresentaram problemas de convergência, não gerando os resultados esperados.

### 3.1 GEOMETRIA E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Foram feitas simulações utilizando um indentador cônico com um semi-ângulo de  $70,3^\circ$ , este valor faz com que a área projetada, para uma determinada altura seja igual à área do indentador Vickers, sendo assim chamado de cone equivalente. Devido à axissimetria do cone, a simulação pode ser realizada com elementos em duas dimensões, o que diminui consideravelmente o número de elementos do problema e promove uma solução mais rápida.

Para o corpo de prova, foi utilizada uma superfície quadrangular, que equivaleria a um cilindro, devido à aplicação da axissimetria.

A validação foi feita utilizando o Aço AISI 1006, Aço AISI 1080 e o Aço Inox TD-08, cujas propriedades de interesse são apresentadas na Tabela 2. Os valores apresentados nessa tabela foram retirados do trabalho de Pulecio. Os dados apresentados foram obtidos no trabalho da autora a partir de ensaios de tração uniaxial.

Para o indentador foram utilizados  $E_i = 1029 \text{ GPa}$  e  $\nu_i = 0,07$ , propriedades do diamante, utilizado nos ensaios apresentados por Pulecio (2010).

**Tabela 2 - Propriedades Mecânicas dos materiais utilizados**

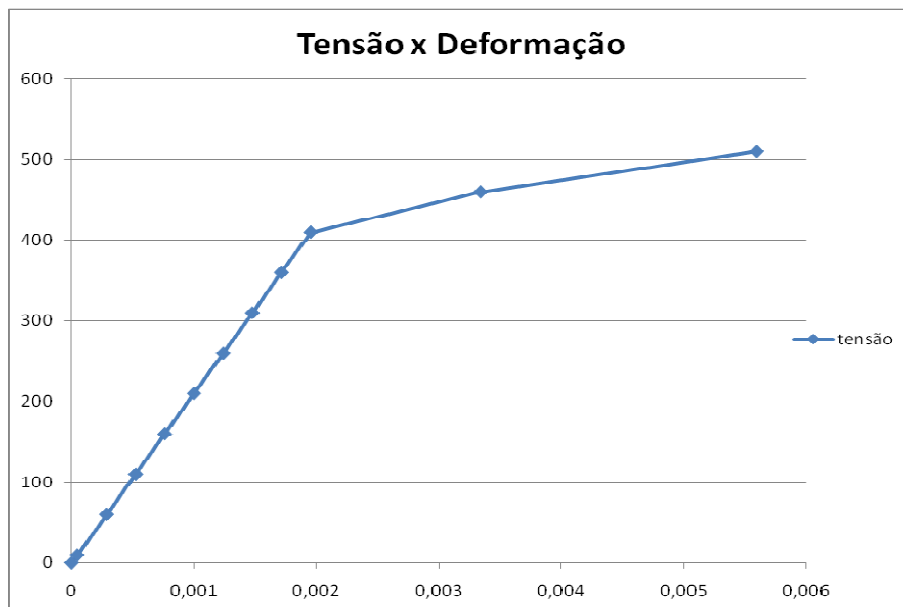
Propriedades	AISI 1006	AISI 1080	TD-08	Unidade
Módulo de Elasticidade ( $E$ )	200	213	210	GPa
Limite de Escoamento ( $Y$ )	221	302	414	MPa
Coefficiente de Encruamento ( $n$ )	0,20	0,17	0,20	-
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,3*	0,3*	0,3*	-

\* A autora utilizou o valor de  $\nu = 0,3$  para todos os materiais utilizados.

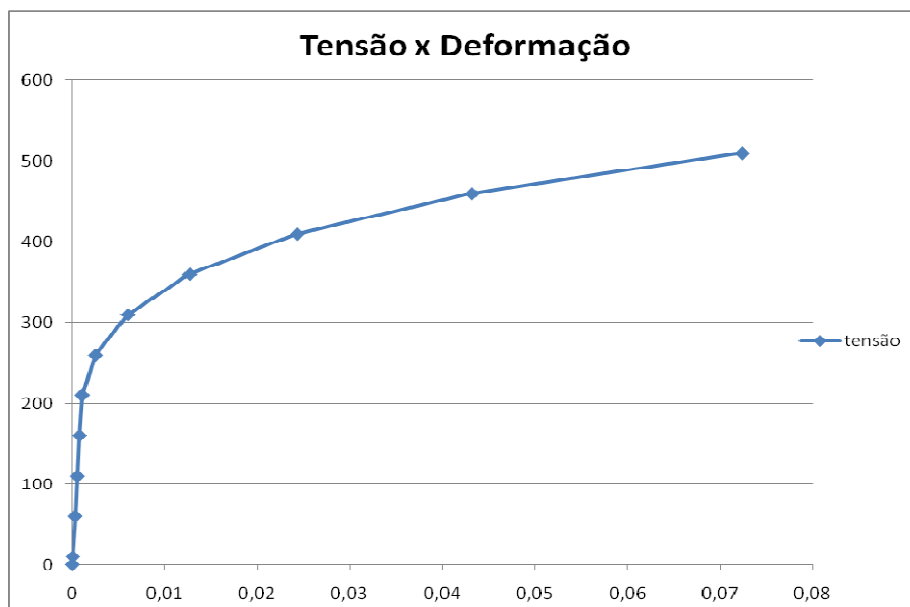
### 3.1.1 Aplicação da plasticidade

A inserção das propriedades plásticas de cada material foi feita a partir da utilização de gráficos multilíneares gerados à partir da Equação 2.14. A tabela com os dados utilizados é apresentada em anexo. Estes resultados geraram os gráficos apresentados nas Figuras de 16 a 18.

Foi utilizado o modelo multilinear com endurecimento isotrópico (MISO). Optou-se pela utilização deste em relação ao modelo com endurecimento cinemático (MKIN), pois o segundo se aplica melhor para a simulação de condições de carga cíclica, o que não foi o caso estudado neste trabalho. Para as simulações futuras, quando forem aplicadas cargas cíclicas no contato entre os cabos, deverão ser feitos testes para verificar a aplicação do modelo de endurecimento cinemático.

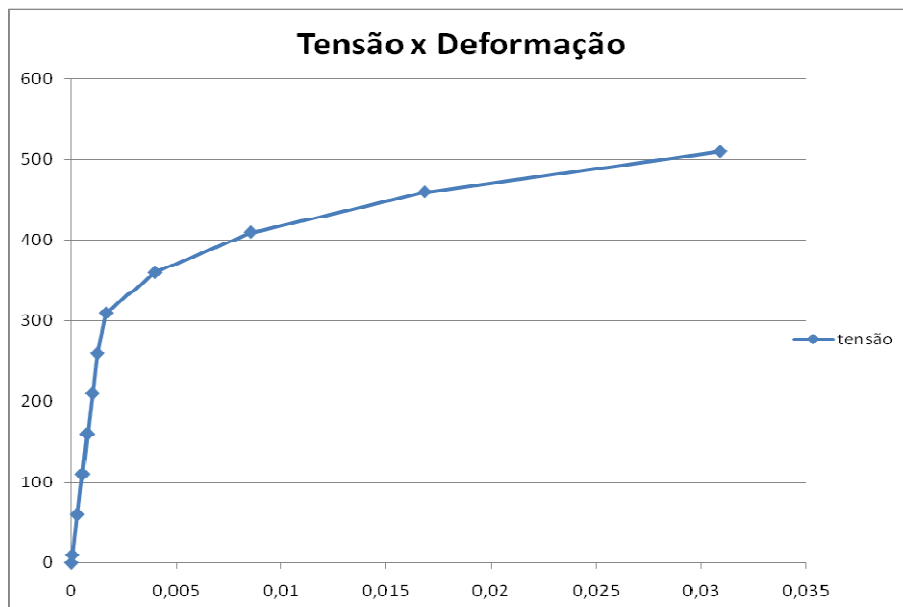


**Figura 16 - Diagrama Tensão x Deformação para o TD-08**



**Figura 17 - Diagrama Tensão x Deformação para o AISI 1006**



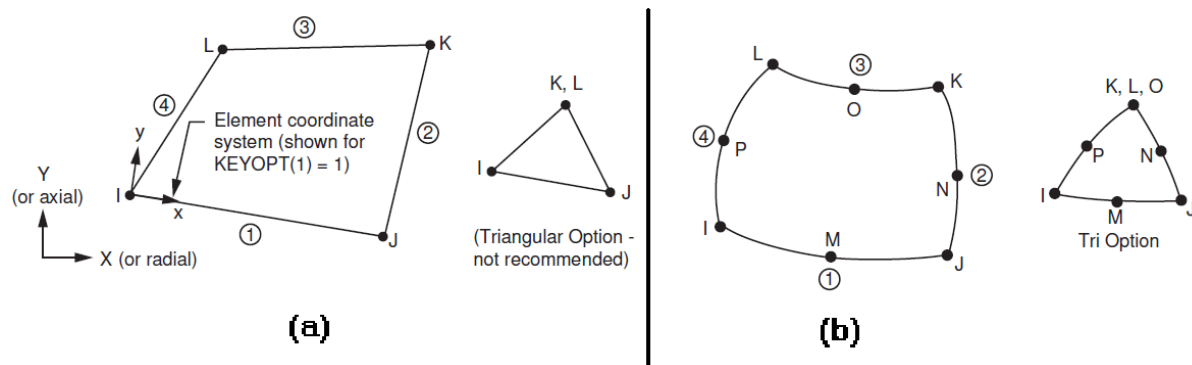


**Figura 18 - Diagrama Tensão x Deformação para o AISI 1080**

## 3.2 TIPOS DE ELEMENTO E MALHA

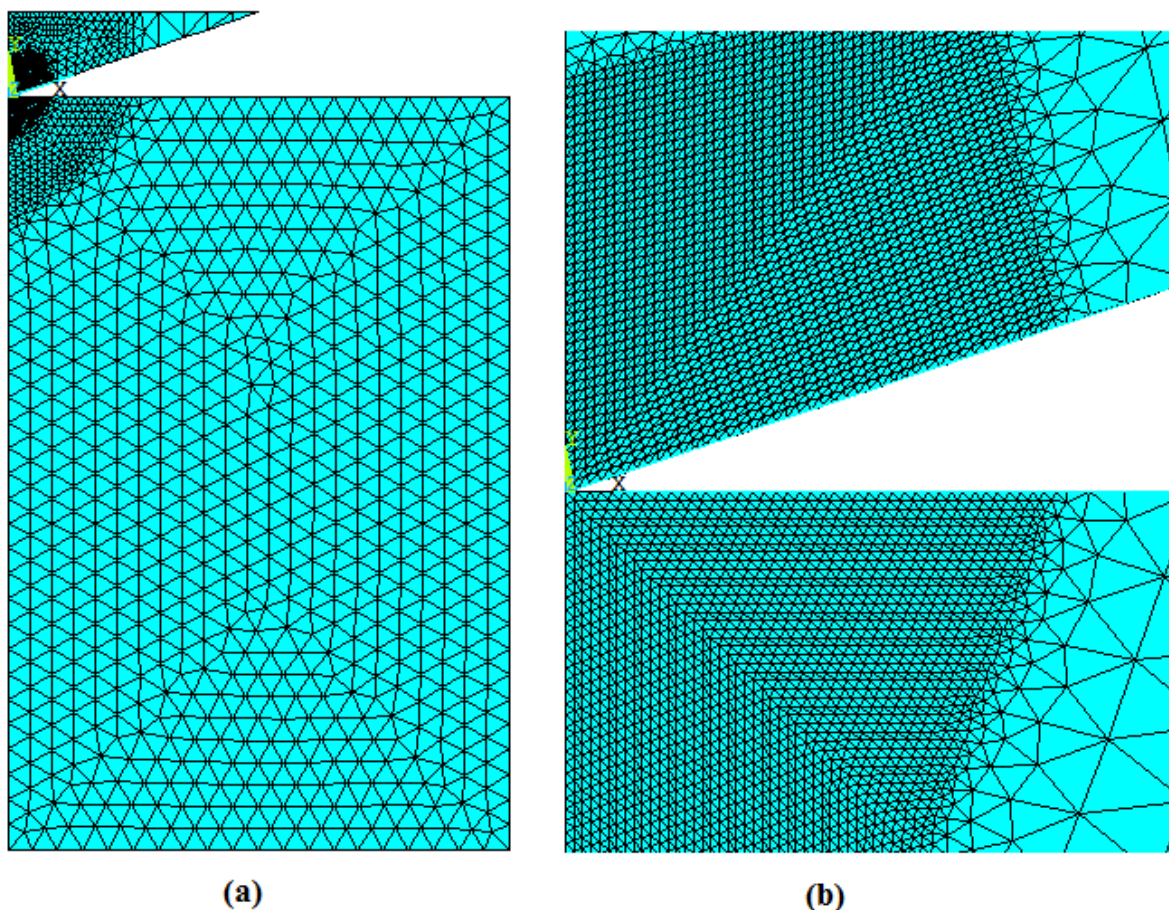
A partir do estudo dos métodos de simulação por elementos finitos do programa Ansys 13, e de estudos da literatura a cerca de modelagem de indentações foram definidos os tipos de elemento a malha utilizados nas simulações. Os elementos apresentados foram utilizados no código implementado, seguindo as informações dadas pelo fornecedor do produto.

Para a modelagem em duas dimensões, foram utilizados elementos do tipo PLANE82 tanto para o indentador quanto para o material indentado. O elemento é estrutural, sólido e composto por quatro lados com oito nós (ou três lados e seis nós, neste caso, define-se o mesmo número de nó para os pontos K, L, e O (Figura 19)). Foi testado também o elemento do tipo PLANE42: estrutural, sólido e composto por quatro lados, com quatro nós (ou três lados e três nós, utilizando o conceito análogo ao do outro elemento). Os resultados obtidos com a utilização do PLANE82 são mais precisos, devido ao maior número de nós, porém leva a um maior tempo de processamento quando comparado com o PLANE42. Como o problema pode ser modelado por uma geometria bidimensional, apesar do refinamento da malha próximo à região do contato, o número de elementos é relativamente reduzido e o tempo de processamento não foi elevado. Assim, ao final, optou-se por utilizar elementos do tipo PLANE82, por apresentarem resultados mais próximos dos obtidos experimentalmente.



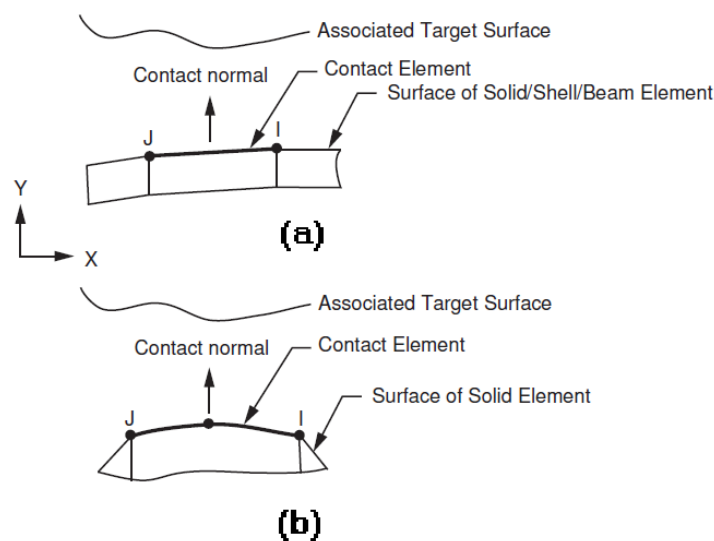
**Figura 19 – Geometria dos elementos planos utilizados: (a) PLANE42 e (b) PLANE82. (Ansys Element Reference)**

A malha no corpo indentado foi refinada nas regiões mais próximas do contato, onde o gradiente de tensões e deslocamentos é mais acentuado. Isto permitiu diminuir o tempo de processamento, mantendo a precisão dos resultados. A malha formada é apresentada na Figura 20. Esta é composta por 4930 elementos no indentador e 6486 no corpo indentado, totalizando 11416 elementos, todos tetraédricos.

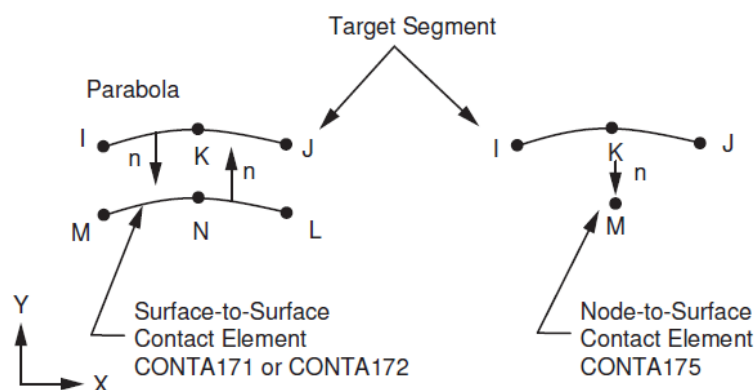


**Figura 20 – (a) Malha de elementos utilizada para simulações numéricas em 2D; (b) Detalhe do refinamento da malha próxima à região do contato**

Para o contato foram utilizados elementos do tipo CONTA, para o caso do PLANE82, foram utilizados os elementos CONTA172, enquanto para o PLANE42 foi utilizado elementos CONTA171. Ambos são mostrados na Figura 21. Estes elementos são utilizados para modelar a situação de contato entre uma superfície e um “alvo”, para eles pode ser definido o coeficiente de fricção considerado, sendo utilizados neste trabalho os seguintes valores:  $\mu = 0$  e  $\mu = 0,1$ , possibilitando a avaliação do efeito do atrito indentaodor-amostra pela comparação com os valores experimentais apresentados por Pulecio (2010). Para simular o contato devem ser utilizados também os elementos TARG169, que estarão na “superfície alvo”, no caso estarão nos contornos do indentador. O TARG169 é composto por elementos de três pontos formando segmentos de parábolas, como mostrado na Figura 22. Este trabalho



**Figura 21 - Geometria dos elementos de contato: (a) CONTA171 e (b) CONTA172 (Ansys Element Reference)**



**Figura 22 - Esquema do contato em superfície alvo utilizando o elemento TARG169 (Ansys Element Reference)**

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISE DA VALIDADE DO CÓDIGO

A validação do código criado para simulações no *software* Ansys ocorrerá através da comparação dos resultados experimentais apresentados por Pulecio (2010). A Tabela 3 apresenta a comparação dos dados obtidos pelo código implementado, em comparação com os dados experimentais apresentados pela autora. Na tabela,  $\rho$  indica o número de ensaios realizados,  $P_{max}$  e  $\delta_{max}$  representam a carga máxima e o deslocamento máximo durante o processo de indentação, respectivamente. Os valores apresentados para  $\delta_{max}$  representam a média dos  $\rho$  ensaios e os erros experimentais. Para os ensaios foi utilizado um indentador do tipo Vickers de diamante, com  $E_i = 1029$  GPa e  $\nu_i = 0,07$ .

**Tabela 3 – Comparação dos resultados experimentais e obtidos pelas simulações**

Material	Quantidade de Ensaios	$P_{max}$ (mN)	$\delta_{max}$ ( $\mu m$ ) (Experimental)*	$\delta_{max}$ ( $\mu m$ ) (Ansys)	Diferença (%)
AISI 1006	30	40	0,954±0,006**	0,968	1,47
	30	50	1,074±0,008	1,087	1,21
	30	60	1,177±0,010	1,195	1,53
	29	70	1,289±0,010	1,282	-0,54
AISI 1080	16	40	0,872±0,011	0,822	-5,73
	16	50	1,000±0,020	0,987	-1,30
	16	60	1,115±0,019	1,093	-1,97
	16	70	1,171±0,018	1,126	-3,84
TD-08	17	300	2,275±0,028	2,261	-0,62
	17	500	2,736±0,036	2,961	8,22
	17	1000	3,948±0,022	4,221	6,91

\* Dados obtidos por Pulecio (2010).

\*\* Os valores dos erros apresentados pela autora com base no intervalo de confiança calculado com 95% de segurança.

Foram feitas simulações para todos os materiais e cargas apresentados. Ao final podem-se notar resultados para o deslocamento máximo próximos aos experimentais, permitindo assim a validação do código desenvolvido. Isto mostra que o problema está bem colocado, trazendo valores condizentes com a realidade. Ao final da simulação, podem-se avaliar valores como o gradiente de tensões no local do contato. Assim, modificações podem ser feitas nos valores de entrada, tomando como base este código.

## 4.2 FENÔMENO DE PILE-UP E SINK-IN

Durante as simulações, inicialmente foram feitos testes desconsiderando a plasticidade dos materiais. Nestes casos observou-se o fenômeno de Sink-In, descrito no Capítulo 2 deste texto. Quando começou-se a considerar a deformação plástica no corpo indentado, foi possível observar a ocorrência do fenômeno oposto, o Pile-Up. As Figura 23 e Figura 24 mostram as duas situações. As linhas vermelhas mostram a localização inicial do indentador e da amostra, antes da aplicação da carga.

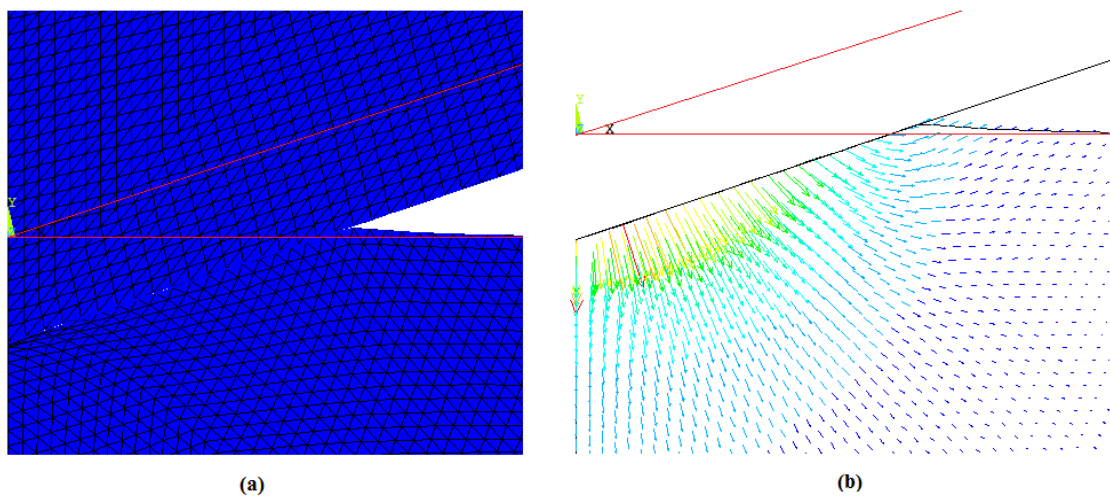


Figura 23 - Fenômeno de Pile-Up, observado na simulação com o material indentado sofrendo deformação plástica

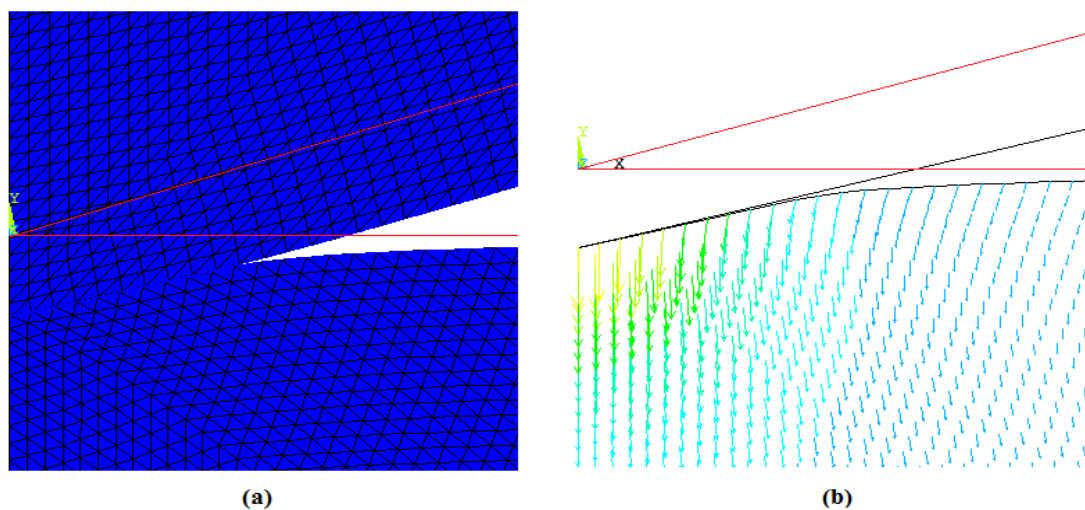


Figura 24 - Fenômeno de Sink-In, observado na simulação com ambos os materiais apenas sofrendo deformação elástica

Foram considerados dois valores para o coeficiente de atrito entre o indentador e a amostra: zero e 0,15. O atrito, como foi visto, favorece o aparecimento do Pile-Up. Para todos os materiais, quando utilizado o coeficiente de atrito não nulo, o fenômeno de Pile-Up continuou acontecendo, porém com uma intensidade menor. Esta intensidade foi medida a partir da altura de contato ( $hc$ ) do material. Para o aço AISI 1006, com uma força de 70mN, o valor de  $hc$  passou de  $1,338\ \mu m$  para  $1,328\ \mu m$  após a aplicação do atrito, o que mostra uma diminuição clara na intensidade do fenômeno de Pile-Up.

### 4.3 FENÔMENO DE RECUPERAÇÃO ELÁSTICA

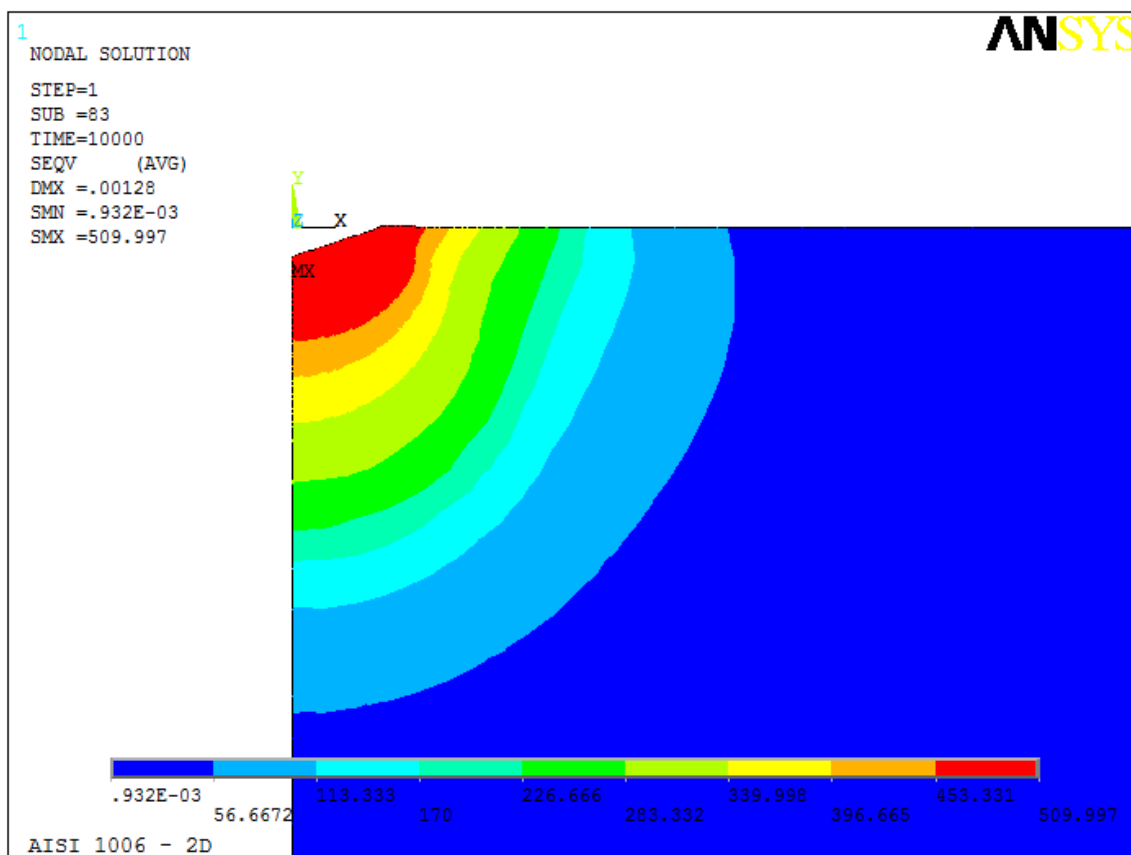
Na simulação foi considerado também o fenômeno de recuperação elástica, presente nos problemas com materiais elasto-plásticos. Após a aplicação da carga e análise dos dados de máxima profundidade. A mesma foi retirada, simulando o que acontece no processo de medição de dureza. Após a retirada da carga, pôde-se verificar que a profundidade da indentação diminuiu, produzindo um valor de profundidade resultante e permitindo a visualização da mocha gerada.

Em comparação com o momento de carga máxima e de carga zero, observou-se uma relação de 96,8% entre o valor de profundidade resultante ( $h_r = 1,239\ \mu m$ ) e profundidade máxima ( $h_{max} = 1,279\ \mu m$ ). Este valor se aproximou do valor experimental de 96%, apresentado no trabalho de Pulecio (2010), o que permite a comprovação da validade da simulação do fenômeno de recuperação elástica.

### 4.4 ESTADO DE TENSÕES DE VON MISES

As simulações numéricas de problemas por meio de elementos finitos permitem obter várias informações cujos resultados analíticos são complexos, ou às vezes impossíveis. Uma informação importante para a análise estrutural de equipamentos é o Estado de Tensões atuante na região mais solicitada. Para este trabalho, considerou-se o critério de Von Mises para o escoamento (e conseqüente) falha do material. O código implementado permite a obtenção do gradiente de tensões no contato. Após mudanças na geometria e condições de contorno, com a aproximação do problema para o contato entre os fios das camadas interna e

externa dos cabos condutores CAA, será possível obter com facilidade o estado de tensões atuantes nos grampos de sustentação. A tensão de Von Mises no corpo indentado para o Aço AISI 1006, com uma carga de 70mN é mostrada na Figura 25.



**Figura 25 - Tensão de Von Mises para o aço AISI 1006**

## 5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Este projeto teve como objetivo obter um código válido para a simulação do contato entre um indentador pontiagudo e um corpo elasto-plástico. O trabalho pode ser dividido em duas partes, descritas a seguir:

A primeira parte do projeto constituiu-se pela busca de informações na literatura, que permitissem o entendimento dos conceitos necessários à realização da modelagem. Foram também realizados estudos sobre o método de programação no programa Ansys para a realização das simulações, possibilitando a definição do tipo de elemento e da malha utilizados. As propriedades mecânicas do material a serem inseridos no programa já estão definidas para as duas etapas de simulação como sendo as dos aços AISI 1006, AISI 1080 e do aço inox TD-08. Para o indentador foi utilizado um material elástico. Foram definidos todos os valores de entrada no programa e o que se esperava obter como resultados das simulações.

Ao final da segunda fase do projeto obteve-se o código validado pela comparação dos valores de deslocamento de mútua aproximação máximo obtidos experimentalmente, e apresentados por Pulecio, com os resultados das simulações numéricas feitas a partir do código desenvolvido. Com isso, pôde-se variar aspectos do contato, como a inserção do atrito, e assim verificando fenômenos como Pile-Up e Sink-In, além da possibilidade de se levantar o estado de tensões na região próxima ao contato. Com isto obteve-se o resultado esperado deste projeto.

A aplicação do atrito provocou uma diminuição no efeito observado de Pile-Up, gerando uma diminuição da altura de contato. O processo de recuperação elástica também foi analisado, observando uma relação de 96,8 % entre a profundidade máxima de contato e a profundidade resultante, um valor bem próximos aos observados experimentalmente. Os valores de deslocamento de mútua aproximação foram comparados aos valores de ensaios experimentais e apresentaram erros baixos para os aços AISI 1006 e AISI 1080, de ordem máxima de 5,7 % e valores um pouco maiores para o TD-08, com um erro máximo observado de 8,2 %. Estes valores dos erros são considerados aceitáveis para a validação do código.

Como dito anteriormente, este trabalho é inicial, ele se propõe a validar um código para simulação do contato entre corpos, para que, em trabalhos posteriores, possam ser



inseridas a geometria e as condições de contorno necessárias para se obter o estado de tensões em cabos condutores. Assim será possível estimar de forma mais precisa a vida destes cabos, promovendo a criação de projetos mais confiáveis e econômicos.

Como proposta para trabalhos futuros, pode ser mencionada a extensão dos conceitos estudados para a análise de corpos tridimensionais, inicialmente simulando o contato de um indentador Vickers, que deve apresentar resultados próximos, devido à utilização do semi-ângulo de  $70,3^\circ$ . Após esta avaliação será possível aplicar a geometria do contato entre dois fios adjacentes de um cabo, além das condições de carga variável, considerando a fricção e possibilitando a aproximação do modelo à situação observada em campo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AULATERMO-TMF1\_aula07\_txt.doc, disponível em [http://www.salulai.com.br/Ftp/EMPRESA\\_302/374540285AULATERMO-TMF1\\_aula07\\_txt\\_rev\\_0.pdf](http://www.salulai.com.br/Ftp/EMPRESA_302/374540285AULATERMO-TMF1_aula07_txt_rev_0.pdf), Acessado em 22 de outubro de 2011.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. Shigley's Mechanical Engineering Design; Eighth Edition, United States of America, McGraw-Hill Science, 2006.

CIPRIANO, G. L. Determinação do coeficiente de encruamento de metais através da morfologia de impressões de dureza na escala macroscópica, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2008.

DIETER, G.E. Metalurgia mecânica. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981.

ELEMENT REFERENCE, disponível em [http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/120/ans\\_elem.pdf](http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/120/ans_elem.pdf), Acessado em 05 de novembro de 2011.

FADEL, A. A., Avaliação do Efeito de Tracionamento em Elevados Níveis de EDS Sobre a Resistência em Fadiga do Condutor Ibis (Caa 397,5 MCM). Dissertação de Doutorado em Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.

HANDBOOK | METAIS & LIGAS | ALUMÍNIO | INFORMAÇÕES TÉCNICAS, disponível em: [http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-conteudos.php?cod\\_tema=10&cod\\_secao=11&cod\\_assunto=58](http://www.infomet.com.br/metais-e-ligas-conteudos.php?cod_tema=10&cod_secao=11&cod_assunto=58), Acessado em 15 de outubro de 2011.

HERTZ, H., Über die berührung fester elastischer Körper (On the contact of rigid elastic solids). In: Miscellaneous Papers. Jones and Schott, Editors, J. reine und angewandte Mathematik 92, Macmillan, London (1896), p. 156 English translation: Hertz, H.

ONLINE MATERIAL INFORMATION RESOURCE, disponível em <http://www.matweb.com/>, Acessado em 22 de outubro de 2011.

OTOMAR, H. P., Estudo comparativo da estampabilidade da liga de alumínio AA1050 partindo de placas obtidas por vazamento direto e bobinas obtidas por vazamento contínuo, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PULECIO, S. A. R., Modelamento do ensaio de indentação instrumentada usando elementos finitos e análise dimensional: análise de unidade, variações experimentais, atrito e geometria e deformações do indentador, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

TRATAMENTOS TÉRMICOS DE LIGAS DE ALUMÍNIO, disponível em <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfFgAH/tratamento-termico-nas-ligas-aluminio>, Acessado em 22 de outubro de 2011.

## Dados de Tensão x Deformação para os materiais utilizados

Tensão (MPa)	Deformação		
	AISI 1006	AISI 1080	TD-08
0	0.000000	0.000000	0.000000
10	0.000050	0.000047	0.000048
60	0.000300	0.000282	0.000286
110	0.000550	0.000516	0.000524
160	0.000800	0.000751	0.000762
210	0.001050	0.000986	0.001000
260	0.002490	0.001220	0.001238
310	0.006001	0.001653	0.001476
360	0.012674	0.003985	0.001714
410	0.024284	0.008564	0.001952
460	0.043171	0.016851	0.0033386
510	0.072319	0.030920	0.0055928

## CÓDIGO UTILIZADO PARA AS SIMULAÇÕES

! Contato indentador cônico 2D

Fini

/clear

! PREFERÊNCIAS

/NOPR

KEYW,PR\_SET,1

KEYW,PR\_STRUC,1

KEYW,PR\_THERM,0

KEYW,PR\_FLUID,0

KEYW,PR\_ELMAG,0

KEYW,MAGNOD,0

KEYW,MAGEDG,0

KEYW,MAGHFE,0

KEYW,MAGELC,0

KEYW,PR\_MULTI,0

KEYW,PR\_CFD,0

/PREP7

/TITLE, AISI 1006 – 2D

! PARÂMETROS

yi=1.685476292e-1

xi=5e-1

yc=15e-1

xc=10e-1

INTER=1e-6

Ei=1029e3

Ec=200e3 ! AISI 1006

! Ec=213e3 ! AISI 1080

! Ec=210e3 ! TD-08

! Ec=68.9e3 ! Al 1350-H19

nu\_i=0.07

nu\_c=0.3

P=0.07

MU=0.15

! PROPRIEDADES ELÁSTICAS

MP,EX,1,Ei ! Módulo de Elasticidade

MP,EX,2,Ec ! Módulo de Elasticidade

MP,PRXY,1,nu\_i ! Poisson

MP,PRXY,2,nu\_c

! ESPECIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS

! ET,1,PLANE42

ET,1,PLANE82

! ET,2,CONTA171

ET,2,CONTA172

ET,3,TARGE169

KEYOPT,1,3,1

! PLASTICIDADE

TB,MISO,2,1,13,0  
TBTEMP,0  
TBPT,,0.00,0.00  
TBPT,,0.00005,10  
TBPT,,0.0003,60  
TBPT,,0.00055,110  
TBPT,,0.0008,160  
TBPT,,0.00105,210  
TBPT,,0.002490392,260  
TBPT,,0.006000803,310  
TBPT,,0.012673992,360  
TBPT,,0.024283998,410  
TBPT,,0.043170797,460  
TBPT,,0.072318896,510

! ATRITO

MP,MU,2,MU

! DEFININDO A GEOMETRIA

! Key-Points

K,1,0,0-INTER  
K,2,xi,yi-INTER  
K,3,0,yi-INTER  
K,4,0,0  
K,5,xc,0  
K,6,xc,-yc  
K,7,0,-yc

! Definindo as áreas

LSTR,1,2  
LSTR,2,3  
LSTR,3,1  
AL,1,2,3  
LSTR,4,5  
LSTR,5,6  
LSTR,6,7  
LSTR,7,4  
AL,4,5,6,7

! Linhas pelos Key-Points

! Define área usando linhas

! CRIANDO A MALHA

! INDENTADOR

MSHAPE,1,2D  
MSHKEY,0  
ESIZE,5.276441067E-2  
MAT,1  
TYPE,1  
AMESH,1  
KREFINE,1,1,1,2,5  
KREFINE,1,1,1,2,5  
KREFINE,1,1,1,2,5  
KREFINE,1,1,1,2,5  
KREFINE,1,1,1,2,14

! Define o tipo de elementos

! Malha Livre

! Tamanho do elemento (1- Malha refinada)

! Define o material

! Define o tipo de elemento

! Gera Malha

! CORPO INDENTADO

MSHAPE,1,2D  
LESIZE,4,,,20  
LESIZE,6,,,20  
LESIZE,5,,,30  
LESIZE,7,,,30  
MAT,2  
TYPE,1  
AMESH,2  
KREFINE,4,4,1,2,5  
KREFINE,4,4,1,2,5  
KREFINE,4,4,1,2,5  
KREFINE,4,4,1,2,5  
KREFINE,4,4,1,2,14

! ELEMENTOS DE CONTATO TARGE169 - INDENTADOR

LSEL,S,LINE,,1  
NSLL,S,1  
NSEL,R,LOC,Y,-0.1e-1,0.5e-1  
MAT,1  
TYPE,3  
ESURF,,TOP  
NSEL,ALL  
LSEL,ALL

! ELEMENTOS DE CONTATO CONTA171 / CONTA172 - CORPO INDENTADO

LSEL,S,LINE,,4  
NSLL,S,1  
NSEL,R,LOC,X,-1e-1,1e-1  
MAT,2  
TYPE,2  
KEYOPT,2,5,1           ! Fecha pequenos gaps no contato  
KEYOPT,2,2,0           ! Algoritmo de contato: Augmented Lagrange Method  
ESURF,,TOP  
NSEL,ALL  
LSEL,ALL

! CONDIÇÕES DE CONTORNO

!SIMETRIA

DL,3,1,SYMM  
DL,7,2,SYMM

!RESTRIÇÕES

LSEL,S,LINE,,6  
NSLL,S,1  
D,ALL,UY,0  
NSEL,ALL  
LSEL,ALL  
LSEL,S,LINE,,3  
NSLL,S,1  
D,ALL,UX,0  
NSEL,ALL  
LSEL,ALL  
LSEL,S,LINE,,2  
NSLL,S,1

```
D,ALL,UX,0
NSEL,ALL
LSEL,ALL
```

```
! GRAUS DE LIBERDADE CASADOS (Geram o movimento conjunto dos nós no grau de
!liberdade definido)
```

```
LSEL,S,LINE,,2
NSLL,S,1
CP,1,UY,ALL
NSEL,ALL
LSEL,ALL
```

```
! FORÇA APLICADA
FK,3,FY,-P
```

```
! SOLUÇÃO
```

```
FINI
/SOLU
ANTYPE,0
NLGEOM,1
DELTIM,100,0.001,10000
TIME,10000
```

```
SOLVE
```